

УДК 622.243.273

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ НИЖНЬОЇ ЧАСТИНИ БУРИЛЬНОЇ
КОЛОНИ ЗІ СТАБІЛІЗАТОРОМ З ВИБОЄМ ТА СТІНКОЮ
СВЕРДЛОВИНИ**

кандидат технічних наук, доцент Кочкодан Я. М., Васько А. І.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
Україна, Івано-Франківськ

Проведені аналітичні дослідження взаємодії навантаження на долото та компоновки низу бурильної колони з вибоєм та стінкою свердловини при бурінні похилих свердловин. Розглянуто вплив розташування та розмірів стабілізатора і напрямної ланки на величину зенітного кута. Отримано аналітичні залежності для визначення відстані від долота до стабілізатора, нормальної складової реакції вибою на долото та напруженого стану напрямної ланки бурильної колони для умов стабілізації зенітного кута. На основі проведених розрахунків встановлено, що зі збільшенням довжини напрямної ланки чи стабілізатора кут стабілізації зменшується.

Ключові слова: стабілізатор, компоновка низу бурильної колони, напрямна ланка, зенітний кут, свердловина, долото, вибій.

кандидат технических наук, доцент Кочкодан Я. М., Васько А. И. Исследование взаимодействия нижней части бурильной колонны со стабилизатором с забоем и стенкой скважины/ Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина, Ивано-Франковск

Проведены аналитические исследования взаимодействия нагрузки на долото и компоновки низа бурильной колонны с забоем и стенкой скважины при бурении наклонных скважин. Рассмотрено

влияние расположения и размеров стабилизатора и направляющего участка на величину зенитного угла. Получены аналитические зависимости для определения расстояния от долота до стабилизатора, нормальной составляющей реакции забоя на долото и напряжённого состояния направляющего участка буровой колонны для условий стабилизации зенитного угла. На основании проведённых расчётов установлено, что с увеличением длины направляющего участка либо стабилизатора угол стабилизации уменьшается.

Ключевые слова: стабилизатор, компоновка низа буровой колонны, направляющий участок, зенитный угол, скважина, долото, забой.

PhD in Technical Sciences, Kochkodan Y. M., Vasko A. I. A research on cooperation with the lower part of column and a stabizer with a stope back and a borehall wall/ Ivano-Frankivsk National Technical University of oil and gas. Ukraine, Ivano-Frankivsk

Analistiv research of impact on boring cutter cooperate with column and borehall wall have been done during drilling directional wall. Influence of location and the stabilizer sizes and feed beam on the measure of renith angle have been regarded. Analistic addictions for definitions a distance from a boring cutter to a stabilizer have been got, as well as normal constituent of the reaction backwall on a boring cutter and feed beam of column conditions for stabilization of renith angle.

In term of the lead computations it was determined that the angle of stabilization is becoming lower at the time of increasing length of feed beam or stabilizer.

Keywords: stabilizer, layout of the bottom of the drill column, direct link, zenith angle, well, bit, get out.

Вступ: Сучасний стан техніки і технології буріння дозволяє споруджувати свердловини найрізноманітнішого призначення, різних конфігурацій ствола та його орієнтування у гірничому масиві. При бурінні нафтових і газових свердловин з тих чи інших причин їх вибої відхиляються від проектного напрямку в результаті чого порушується сітка розробки родовища. Вибої вертикальних свердловин зміщуються відносно своїх проектних положень на десятки і сотні метрів. Інтенсивність зенітного і азимутального викривлення не відповідає проектним завданням. Стволи таких свердловин у більшості випадків мають різкі перегини, які негативно на процес подальшого поглиблення свердловини, її кріпленні та експлуатації. У результаті викривлення стволів можливі ускладнення та аварії, ліквідація яких вимагає великих затрат часу та матеріальних засобів.

Щоб уникнути небажаних наслідків викривлення свердловини необхідно знайти причини та закономірності викривлення та забезпечити проведення свердловини у заданому напрямку. Важливою проблемою при цьому є розроблення науково-обґрунтованих технологічних рекомендацій для оптимального управління системою долото - компоновка низу бурильної колони (КНБК) - колона бурильних труб при бурінні свердловин у найрізноманітніших геологічних умовах. Особливо це важливо при бурінні похилих свердловин для забезпечення попадання вибою у проектну точку пласта та правильного вибору параметрів режиму буріння та КНБК при бурінні вертикальних свердловин для запобігання їх викривлення.

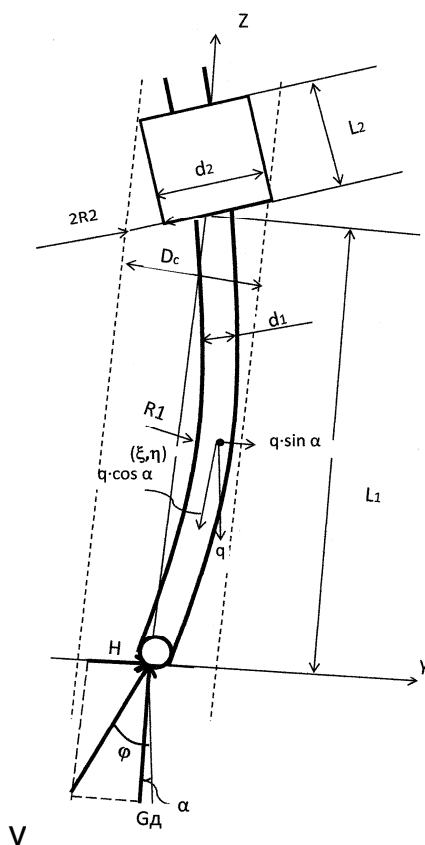
Проблема управління траєкторією свердловини передбачає проведення комплексних досліджень різних аспектів технології буріння. Зокрема, необхідно дослідити стійкість нижньої частини бурильної колони, оскільки в основному прогин осі КНБК обумовлює

характер розподілу сил, які діють на долото у процесі буріння свердловин.

Нами аналітично досліджено вплив нижньої частини бурильної колони з вибоєм та стінкою свердловини при наявності центратора [1].

Основна частина: Для регулювання відхилення ствола свердловини використовують стабілізатори, проте не визначено оптимальної довжини стабілізатора та його взаємодія зі стінкою свердловини. Зокрема, деякі автори робіт [2,3] та інші вважають, що довжина стабілізатора повинна бути три метри і більше, а зазор між стабілізатором і стінкою свердловини не повинен перевищувати три – чотири міліметри. Проте даних про вплив геометричних розмірів прямої ланки бурильної колони, навантаження на долото, густини промивальної рідини на величину нормальної складової реакції вибою на долото та кут стабілізації викривлення свердловини не подають.

У даній роботі стабілізатором вважають жорсткий циліндричний елемент бурильної колони, який може контактувати зі стінкою свердловини або всією боковою поверхнею (при відсутності бокового зазору між ним і стінкою свердловини), або верхнім і нижнім краєм (при наявності зазору), що обумовлює деякий перекид його у стволі свердловини. Величина цього перекосу залежить як від співвідношення діаметрів свердловини і стабілізатора, так і довжини стабілізатора. Наявність чи відсутність цього перекосу та відстань від долота до стабілізатора впливає на формування нормальної складової реакції вибою на долото, величина якої може сприяти збільшенню, зменшенню або стабілізації зенітного кута осі свердловини [4].



$L1$ - довжина прямої ланки;

d_1, d_v, d_2 - відповідно зовнішній і внутрішній діаметр напрямної

ланки та діаметр опорної поверхні стабілізатора;

D_d - діаметр долота;

H, G_o - відповідно нормальна та осьова компоненти реакції вибою навантаження на долото.

Безрозмірне диференціальне рівняння пружної осі напрямної ланки бурильної колони за П.А. Зего має вигляд:

$$\frac{d^3U(x)}{dx^3} = -(x_2 - x) \frac{dU(x)}{dx} + x + h \quad (1)$$

Тричі проінтегрувавши дане рівняння, отримаємо:

$$\frac{d^2U}{dx^2} = -(x_2 - x)U - \int_0^x U dx + \frac{x^2}{2} + h + E \quad (2)$$

$$\frac{dU}{dx} = -(x_2 - x) \int_0^x U dx - 2 \int_0^x \int_0^x U dx dx + \frac{x^3}{6} + \frac{hx^2}{2} + Ex + F \quad (3)$$

$$U = -(x_2 - x) \int_0^x \int_0^x U dx dx - 3 \int_0^x \int_0^x \int_0^x U dx dx dx + \frac{x^4}{24} + \frac{hx^3}{6} + \frac{Ex^2}{2} + Fx + M \quad (4)$$

Для розв'язку рівнянь (2) – (4) використаємо метод апроксимації, згідно з яким дійсна функція U описується наближеною U_a , за умови, що в кінцевих точках значення дійсної та наближеної функції рівні.

Як апроксимуючу функцію виберемо кубічну параболу.

$$U_a = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D \quad (5)$$

Підставивши у рівняння (2-4) замість функції U апроксимуючу функцію U_a та проінтегрувавши рівняння, отримаємо:

$$\frac{d^2U_a}{dx^2} = -(x_2 - x) \cdot (Ax^3 + Bx^2 + Cx + D) - \left(A \frac{x^4}{4} + B \frac{x^3}{3} + C \frac{x^2}{2} + Dx \right) + \frac{x^2}{2} + hx + E \quad (6)$$

$$\frac{dU_a}{dx} = -(x_2 - x) - \left(A \frac{x^4}{4} + B \frac{x^3}{3} + C \frac{x^2}{2} + Dx \right) - 2 \left(A \frac{x^5}{20} + B \frac{x^4}{12} + C \frac{x^3}{6} + D \frac{x^2}{2} \right) + \frac{x^3}{6} + \frac{hx^2}{2} + Ex + F \quad (7)$$

$$U_a = -(x_2 - x) - \left(A \frac{x^5}{20} + B \frac{x^4}{12} + C \frac{x^3}{6} + D \frac{x^2}{2} \right) - 3 \left(A \frac{x^6}{120} + B \frac{x^5}{60} + C \frac{x^4}{24} + D \frac{x^3}{6} \right) + \frac{x^4}{24} + \frac{hx^3}{6} + E \frac{x^2}{2} + Fx + M \quad (8)$$

Для знаходження невідомих у рівняннях (5-8) задамось такими граничними умовами:

$$\text{При } x = 0; U = 0; U_a = 0; \frac{d^2 U}{dx^2} = 0 \quad (9)$$

$$\text{При } x = L; U = U_a = R_2; \frac{dU}{dx} = K \quad (10)$$

$$\text{При } x = \frac{1}{3}L; U = U_a; \quad (11)$$

$$\text{При } x = \frac{2}{3}L; U = U_a; \quad (12)$$

Дані граничні умови дозволяють визначити 8 невідомих (A, B, C, D, E, F, M, h) , виразивши їх через 8 інших невідомих $(D_\delta, d_1, d_v, d_2, G_\delta, \rho_p, \alpha_i, L1(\text{або } L2))$, які вважаємо відомими параметрами (параметрами, що задаються).

Для переведення розмірних параметрів у безрозмірні використаємо такі залежності:

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{\pi}{64}(d_1^4 - d_v^4) \\ q &= \frac{\pi}{4}(d_1^2 - d_v^2) \cdot (\rho_m - \rho_p) \\ L &= \frac{L1}{m} \\ m &= \sqrt[3]{\frac{EI}{q \cos \alpha}} \\ R_2 &= \frac{D_\delta - d_2}{2m \operatorname{tg} \alpha} \\ x_2 &= \frac{G_\delta}{mq \cos \alpha} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Тоді

$$K = \frac{l_1 \cdot \sin \alpha \left[\operatorname{arctg} \frac{D_\delta - d_2}{L1} - \operatorname{arctg} \frac{D_c - d_2}{2L1} \right]}{(L1 + L2) \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (14)$$

Використовуючи задані граничні умови (9-12) та рівняння (5-8) отримаємо:

$$M = 0; E = 0; D = 0$$

$$C = \frac{R_2}{L} - AL^2 - BL$$

$$F = K - x_2 L \cdot \left(\frac{1}{4} L^3 + \frac{1}{6} BL^2 - \frac{1}{2} R_2 \right) + \frac{1}{6} L^2 \left(\frac{1}{10} L^3 - L - R_2 - 3h \right) \quad (15)$$

$$h = -x_2 \cdot \left(\frac{2}{5} AL^2 + \frac{1}{4} BL - \frac{R_2}{L} \right) - \frac{1}{40} BL^2 - \frac{3}{8} L - \frac{3}{8} R_2 + \frac{3}{L^2} \left(K - \frac{R_2}{L} \right) \quad (16)$$

Для визначення коефіцієнтів A та B використаємо умову рівності функцій U та U_a в заданих точках осі свердловини. Враховуючи вищенаведене та після відповідних спрощень отримаємо:

$$\text{При } x = \frac{1}{3}L \quad B = \frac{S_1 - AS_2}{S_1} \quad (17)$$

$$\text{При } x = \frac{2}{3}L \quad A = \frac{S_1 - BS_3}{S_1} \quad (18)$$

$$S_1 = \frac{1}{48} \left[(2x^3 - 3Lx^2 + L^3) \cdot \left(\frac{R_2}{L} + 1 \right) + 24 \frac{R_2}{L} \left(1 - \frac{x^2}{L^2} \right) \cdot \left(K \frac{L}{R_2} - 1 \right) \right] \quad (19)$$

$$AS_2 = A \left[x^2 - L^2 + \frac{x_2}{20} (x^2 - L^2)^2 - \frac{1}{40} x^5 + \frac{1}{24} x^3 L^2 - \frac{1}{60} L^5 \right] \quad (20)$$

$$BS_3 = B \left[x - L + \frac{x_2}{24} (2x^3 - 3K^2 L + L^3) - \frac{1}{3} x^4 + \frac{1}{24} x^3 L + \frac{1}{240} x^2 L^2 - \frac{1}{80} L^4 \right] \quad (21)$$

3 врахуванням визначених коефіцієнтів та постійних інтегрування рівняння (6-8) набувають вигляду:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^3 U}{dx^3} &= -(x_2 - x) \frac{dU}{dx} + x + h \\ \frac{d^2 U_a}{dx^2} &= -(x_2 - x) \cdot x \cdot (Ax^2 + Bx + C) - x^2 \left(\frac{1}{4} Ax^2 + \frac{1}{3} Bx + \frac{1}{2} C \right) + \frac{x^2}{2} + hx \\ \frac{dU_a}{dx} &= -(x_2 - x) \cdot x^2 \cdot \left(\frac{1}{4} Ax^2 + \frac{1}{3} Bx + \frac{1}{2} C \right) - x^3 \left(\frac{1}{10} Ax^2 + \frac{1}{12} Bx + \frac{1}{6} C \right) + \frac{x^3}{6} + \frac{hx^2}{2} + Fx \\ U_a &= -(x_2 - x) \cdot x^3 \cdot \left(\frac{1}{20} Ax^2 + \frac{1}{12} Bx + \frac{1}{6} C \right) - x^4 \left(\frac{1}{40} Ax^2 + \frac{1}{20} Bx + \frac{1}{8} C \right) + \frac{x^4}{24} + \frac{hx^2}{6} + Fx \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

$$h = -(x_2 - L) \cdot \left(\frac{2}{5} AL^2 + \frac{1}{4} BL - \frac{R_2}{L} \right) - \frac{2}{5} AL^3 - \frac{11}{40} BL^2 + \frac{5}{8} R_2 - \frac{3}{8} L - \frac{3R^2}{L^3} + \frac{3K}{L^2} \quad (23)$$

$$L = \frac{8}{3} \cdot \left[-x_2 \left(\frac{2}{5} AL^2 + \frac{1}{4} BL - \frac{R_2}{L} \right) - \frac{1}{40} BL^2 - \frac{3}{8} R_2 + 3 \frac{K}{L^2} - 3 \frac{R^2}{L^3} - h \right] \quad (24)$$

Рівняння (17) - (21), (24) є трансцендентними, а тому невідомі величини розв'язують методом ітерації. Для визначення невідомих та реалізації отриманих залежностей розроблені спеціальні програми для ЕОМ на мові Mathcad, які передбачають два варіанти розв'язку:

а) при заданій довжині прямої ланки $L1$;

б) при заданій довжині стабілізатора $L2$.

У таблиці 1 наведено вплив кута стабілізації на довжину прямої ланки (КНБК) $L1$ та довжину стабілізатора $L2$.

На рисунках 2 і 3 показані результати розв'язку отриманих залежностей для конкретного випадку.

Таблиця 1 - Вплив довжин КНБК $L1$ та стабілізатора на кут стабілізації.

Кут стабілізації α , град	КНБК-1		КНБК-2		КНБК-3	
	$L1$, м	$L2$, м	$L1$, м	$L2$, м	$L1$, м	$L2$, м
1	10,52	5,5	8,7	4,34	7,82	4,12
2	9,02	4,5	7,55	3,53	6,95	3,25
3	8,31	3,98	6,85	3,15	6,2	2,89
4	8,22	3,6	6,25	2,94	5,6	2,69
5	7,07	3,52	5,8	2,79	5,23	2,54
7	6,61	3,2	5,25	2,57	4,75	2,33
10	6,15	2,9	4,72	2,34	4,25	2,13
15	5,64	2,6	4,2	2,12	3,8	1,92
20	5,35	2,4	3,82	1,98	3,43	1,77
23	5,26	2,3	3,66	1,92	3,28	1,73
25	5,18	2,25	3,6	1,88	3,24	1,69
30	4,98	2,15	3,46	1,8	3,11	1,62
45	4,42	2,0	3,24	1,64	2,92	1,47
60	3,86	1,95	3,14	1,55	2,79	1,39
75	3,72	1,9	3,07	1,51	2,75	1,35
89	3,57	1,89	3,0	1,5	2,71	1,34

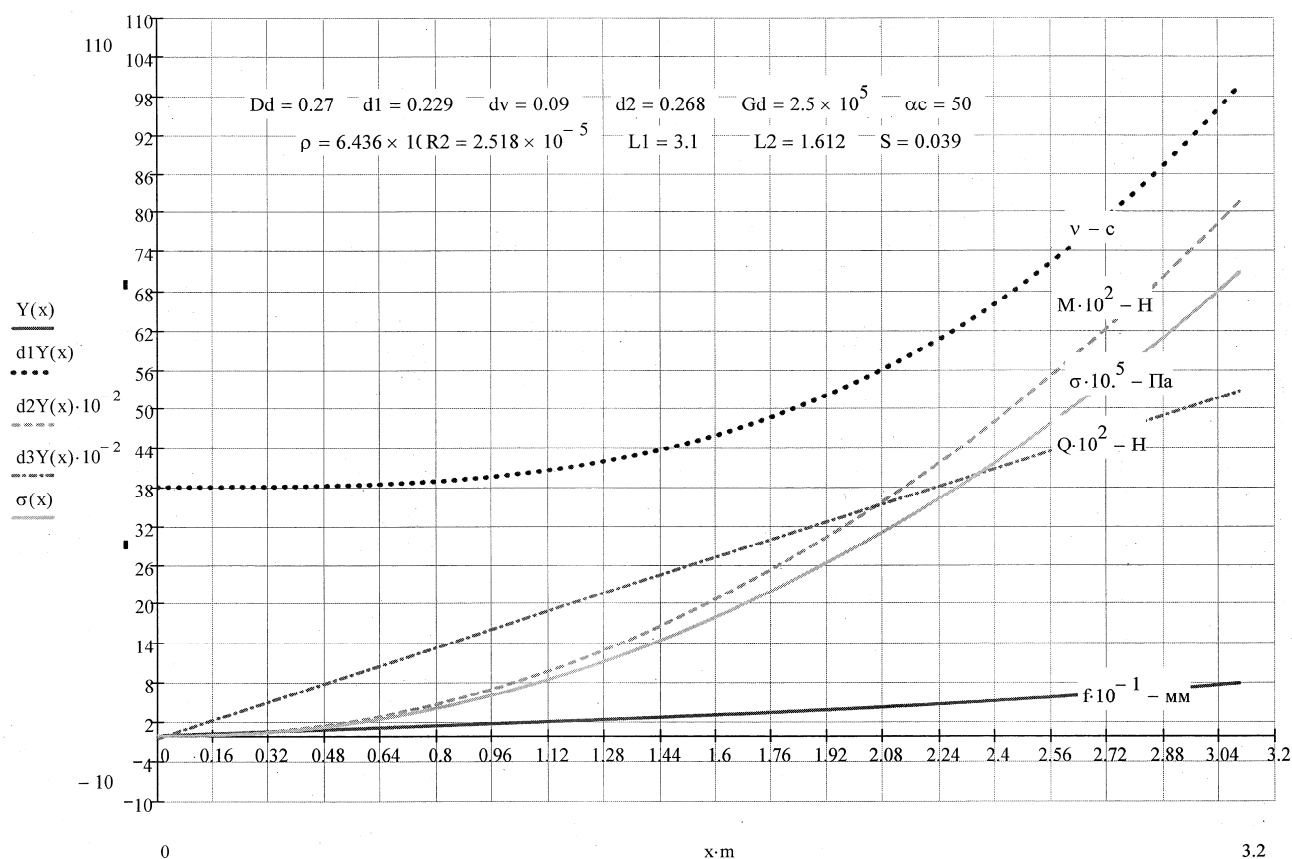


Рис. 2. Напружений стан КНБК у випадку застосування стабілізатора

Gd - навантаження на долото;

$d1, dv, d2$ та Dd - відповідно зовнішній, внутрішній діаметри напрямної ланки, діаметри опорної поверхні стабілізатора та долота;

ρ - густина промивальної рідини;

α_c - кут стабілізації;

$L1$ та $L2$ - відповідно довжини напрямної ланки та опорної поверхні стабілізатора;

$R2$ - радіальний зазор між стабілізатором та стінкою свердловини;

f, v, M, Q, σ - відповідно стріла прогину, кут нахилу дотичної до осі свердловини, згинальний момент, поперечна сила та напруження згину.

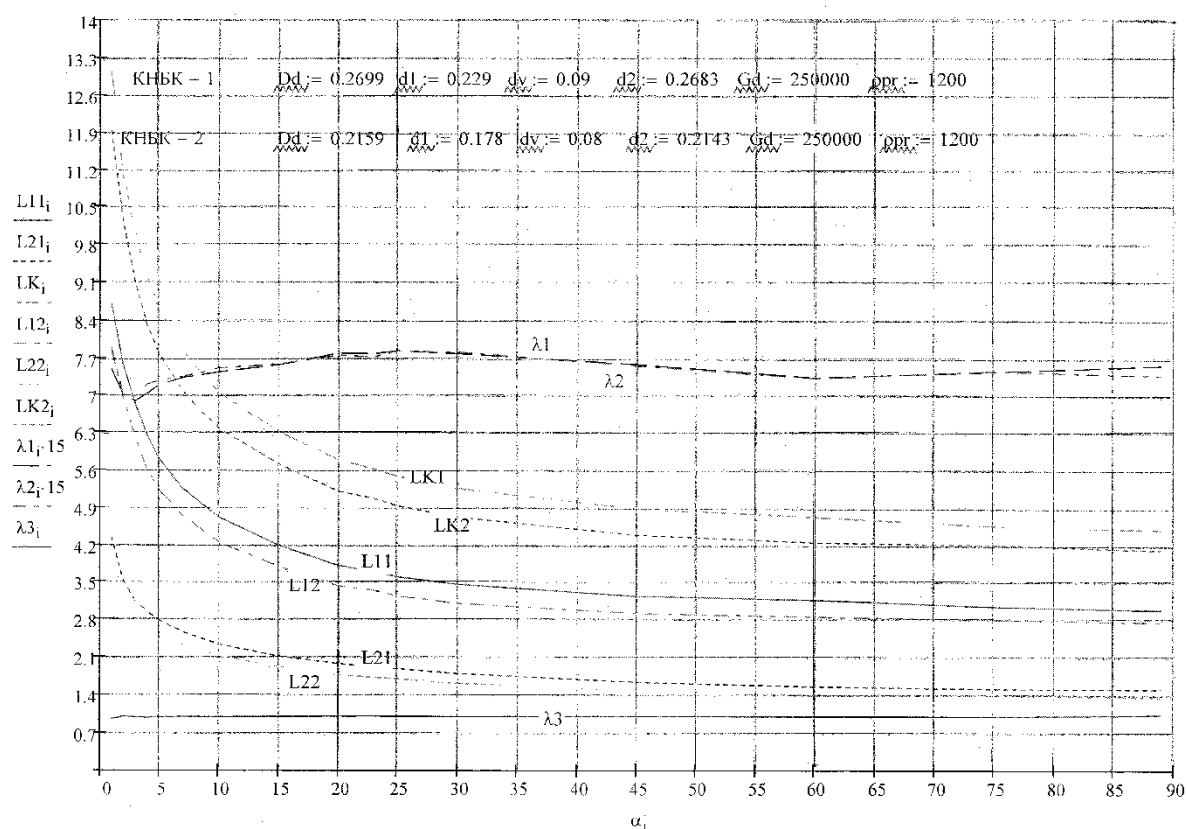


Рис. 3. Вплив кута стабілізації на довжини КНБК та стабілізатора

Аналіз даних таблиці 1 та рисунка 3 свідчить, що зі збільшенням кута стабілізації зменшується як довжина прямої ланки, так і довжина контактної поверхні стабілізатора для різних компоновок низу бурової колони.

Зі збільшенням осьового навантаження на долото зростає згинаючий момент, поперечна сила, напруження згину, кут викривлення, а стріла прогину практично не змінюється (рисунк 2). Проте вплив осьового навантаження та густини промивальної рідини на довжини плечей $L1$ та $L2$ при збільшенні кута стабілізації є незначний (рисунк 3).

Проведені аналогічні розрахунки для інших типорозмірів доліт та елементів КНБК згідно з наведеною методикою показали, що характер зміни кривих аналогічні, хоча абсолютні значення дещо відрізняються, оскільки інші вихідні дані.

Висновки:

1. Отримані аналітичні залежності для визначення нормальної складової реакції вибою на долото при застосуванні стабілізатора та для визначення довжин нижнього та верхнього плеча КНБК для умови стабілізації зенітного кута.
2. Збільшення довжин плечей компоновок низу бурильної колони і стабілізатора зменшує кут стабілізації свердловини.
3. Результати проведених розрахунків можуть бути використані для проектування параметрів компоновок низу бурильної колони, які забезпечують заданий кут стабілізації.

Література:

1. Кочкодан Я. М. Вплив індексу анізотропії на відхилення осі свердловини від проектного профілю /Я. М. Кочкодан, А. І. Васько, Р. Л. Добруцький // Науковий потенціал 2017. Матеріали XIII Міжнародної інтернет конференції// Київ: ТК Меганом, 2017. - с.72-90.
2. Бурение наклонных и горизонтальных скважин: Справочник / [Калинин А. Г., Никитин Б. А., Солодкий К. М., Султанов Б. З.] – М. – Недра, 1997. – 648с.
3. Мислюк М. А. Буріння свердловин: Довідник т.3. Вертикальне та скероване буріння. /М. А. Мислюк, І. Й. Рибчич, Р. С. Яремійчук. – К. Інтерпрес ЛТД. – 2004. – 292 с.
4. Васько І. А. Про вплив розташування та розмірів стабілізатора на величину зенітного кута / І. А. Васько, А. І. Васько // Науковий вісник / Івано-Франківськ. ІФНТУНГ, 2010 №4 стор. 37-41.
5. Вудс Г. Искривление скважин при бурении / Г. Вудс, А. Лубинский // М.: Гостоптехиздат. - 1960. – 161 с.

References:

1. Kochkodan Ya. M. Vplyv indeksu anizotropii na vidkhylennia osi sverdlovyny vid proektnoho profilu /Ia. M. Kochkodan, A. I. Vasko, R. L. Dobrutskyi // *Naukovyi potentsial* 2017. *Materialy XIII Mizhnarodnoi internet konferentsii*// Kyiv: TK Meganom, 2017. - s.72-90.
2. *Burenne naklonnykh y horyzontalnykh skvazhyn: Spravochnyk* / [Kalynyn A. H., Nyktytn B. A., Solodkyi K. M., Sultanov B. Z.] – M. – Nedra, 1997. – 648s.
3. Mysliuk M. A. *Burinnia sverdlovyn: Dovidnyk t.3. Vertykalne ta skerovane burinnia.* / M. A. Mysliuk, I. Y. Rybchych, R. S. Yaremiichuk. – K. Interpres LTD. – 2004. – 292 s.
4. Vasko I. A. *Pro vplyv roztashuvannia ta rozmiriv stabilizatora na velychynu zenitnoho kuta* / I. A. Vasko, A. I. Vasko // *Naukovyi visnyk / Ivano-Frankivsk. IFNTUNH*, 2010 №4 stor. 37-41.
5. Vuds H. *Yskryvlenye skvazhyn pry burenyy* / H. Vuds, A. Lubytskyi // M.: Hostoptekhyzdat. - 1960. – 161 s.